



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Massive Object Transportation by Robots [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	梁, 宰誠
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13733号
Issue Date	2019-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75953
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yang_Jaesung_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学)

氏名 梁 宰誠

審査担当者 主 査 教 授 近野 敦

副 査 教 授 小野里 雅彦

副 査 教 授 小笠原 悟司

学位論文題名

Massive Object Transportation by Robots

(ロボットによる重量物搬送)

ロボットには人間に代わって危険な作業を行うことが期待されている。重量物の搬送は、そのような危険な作業の一つである。

宇宙開発では、例えば国際宇宙ステーションのように、スペースシャトルが宇宙へ運んだ大質量の宇宙構造物のモジュールをスペースシャトルや宇宙ステーションに搭載されたロボットアームで所定の場所に搬送し、建築が行われた。このような作業ではロボットアームの質量に比べ搬送対象物の質量が極めて大きく、搬送時にアーム本体やアームジョイント部の過負荷が問題となる。これまではスペースシャトルや宇宙ステーションなど現場にいる宇宙飛行士が注意深くロボットアームの操作を行うことで、この問題に対処してきた。しかし将来の宇宙開発では、人間が宇宙に行くことなく、地球上から宇宙にあるロボットアームの遠隔操作を行うことで、宇宙構造物を建築することが期待されている。このような遠隔操作では地球から宇宙へ送信する操作指令、宇宙ロボットから地球へ送信するカメラ映像などのセンサ情報の双方に通信時間遅れが発生する。この通信時間遅れにより、操作者は時間遅れ分前の宇宙ロボットの状態しかわからず、操作性が著しく損なわれる。

一方、地上では重力の存在のため、大質量の物体をロボットで搬送する場合、持ち上げて搬送することは困難で、複数のロボットで押したり引いたりして搬送することになる。そのため搬送物体の慣性力のみならず、搬送物体と地面の摩擦も搬送を困難にする原因となる。また、ロボットが物体を押す、または引く力を適切に制御しないと、ロボットが作用する力の反作用でロボット自身にスリップが発生し搬送が困難となる。

本論文は以上の問題を解決するために、時間遅れのある宇宙ロボット遠隔操作による大質量物体搬送手法、および複数ヒューマノイドロボットによる物体搬送動作オンライン生成手法を提案するもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、時間遅れのある宇宙ロボット遠隔操作で大質量の宇宙構造物を搬送する作業を想定し、ロボットアームに発生する負荷を制御しつつ指令された運動を実現する、力・運動混合指令型遠隔制御法を提案している。提案手法では、操作用のロボットアームと操作される宇宙ロボットアームの間に仮想環境を置く。仮想環境内の仮想ロボットアームと仮想搬送物体は実宇宙環境のシミュレータである。操作者は時間遅れの無い仮想ロボットアームを操作し、仮想搬送対象物を搬送する。大質量搬送対象物の慣性力によって宇宙ロボットアームに発生する力は、宇宙ロボットアームの局所力フィードバックにより軽減される。また、この局所フィードバックにより仮想環境(仮想ロボットアームと仮想搬送物)と実環境(宇宙ロボットアームと実搬送物)のモデル化誤差も吸収される。局所力フィードバックによって生じる仮想環境と実宇宙環境のロボットアームと搬送対象物位置誤差は、宇宙環境から仮想環境への位置フィードバックにより修正される。提案する遠隔制御法は、Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS) によりその有効性が確認された。この提案は、地上から

の遠隔操作による宇宙開発に道を開くものであり、極めて重大な提案である。

第3章では地上において、大質量物を1台のヒューマノイドロボットで押し/引き動作により搬送するための実時間動作生成手法を提案している。搬送対象物として、1台のロボットでは持ち上げることができない重量物を想定している。このような問題では、物体を押し/引く力を適切に制御しないと、反作用力によりロボットの足と床面にスリップが生じ、搬送が困難となる。そこで、押し/引き動作による重量物搬送を二次計画問題 (QP 問題) として定義し、足裏と床面のスリップ条件、ジョイント角度および角速度制限を不等式制約条件として与え、制約条件を満たしつつ正規化ジョイントトルクを最小にするようなジョイント角加速度を実時間で計算する手法を提案した。従来の類似の手法では、ロボットの足裏と床面の摩擦問題に対し、摩擦円錐を四角錐で近似し、四角錐内に収まるような床反力 (滑りを生じさせない足裏反力) を設計変数として解いていたが、この手法では二次計画問題が解けない (適切な解が得られない) ことが頻発していた。そこで、足裏に空中に浮遊する仮想大質量を設定し、その質量に発生する加速度から足裏発生反力を推定しそれを制約条件の中で用いることにより安定して二次計画問題が解ける手法を提案している。提案手法の有効性を、動力学シミュレーションを行うことで確認している。この成果は第4章、第5章の複数のヒューマノイドロボットでの重量物搬送へとつながる重大な成果である。

第4章では、第3章で扱った問題を発展させ、2台のヒューマノイドロボットでの大質量物搬送問題を扱っている。大質量 (200 kg) の物体を、1台のヒューマノイドが押し、もう1台のヒューマノイドロボットが引き、搬送させる問題を題材に、第3章同様に二次計画問題を解くことでロボットの動作を生成している。従来手法である PD 制御を適用して物体搬送した場合と提案手法を適用した場合について動力学シミュレーションを行い、従来手法の PD 制御では足裏と床面との摩擦条件への考慮が無いためにスリップが発生し搬送に失敗したのに対し、提案手法では足裏と床面がスリップすることなく物体を搬送することに成功することを確認した。また PD 制御に比べ提案手法では、より小さい正規化ジョイントトルクで搬送に成功しており、エネルギー効率の良い動作が生成できていることが確認された。この成果は、例えば災害現場での経路確保のため大質量瓦礫を複数台のロボットで除去する作業などへの応用が期待される重要な成果である。

第5章では、第4章の成果をさらに発展させ、2台のヒューマノイドロボットによる連続間歇歩容での重量物搬送問題を扱っている。また搬送対象物の質量を、75, 100, 125, 150, 175, 200 kg と変化させ、PD 制御を適用した場合と提案手法を適用した場合について動力学シミュレーションで比較している。75 kg と 100 kg の場合では PD 制御と提案手法での差がわずかであったが、搬送物体の質量が大きくなるにつれ、PD 制御では足裏と床面のスリップが顕著になった。一方、提案手法ではすべての場合においてほとんどスリップが生じず、提案手法の優位性を確認した。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、時間遅れのある宇宙ロボット遠隔操作による大質量物体搬送手法、および複数ヒューマノイドロボットによる物体搬送動作オンライン生成手法を提案するもので、地上からの宇宙ロボット遠隔操作による宇宙開発の可能性を示したこと、地上での複数ヒューマノイドロボットによる大質量物搬送により人間の作業を代替できる可能性を示したことの重要性を考慮すると、システム情報科学およびロボット工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。